

分类号: < 分类号 >

学号: < 学生学号 >

UDC: <UDC 号 >

密级: 公开

河海大学

博士学位论文

寒冷地区渗水病害影响下混凝土坝  
服役性态多尺度分析方法

作者姓名

指导教师姓名: 导师姓名 教授 博导

学院名称 南京市西康路 1 号

申请学位等级: 工学博士 专业名称: < 专业名称 >

论文提交日期: 2018 年 7 月 论文答辩日期: 2018 年 9 月 7 日

学位授予单位和日期: 河海大学 2018 年 9 月 26 日

答辩委员会主席: 主席 A

答辩委员会成员: 专家 A、专家 B、专家 C、专家 D、专家 E、专家 F

2018 年 9 月 中国 · 南京



分类号 (中图法)<分类号>     UDC(DDC)<UDC 号>     密级 公开

论文作者姓名 作者姓名     学号 < 学生学号 >     单位 河海大学

论文中文题名寒冷地区渗水病害影响下混凝土坝服役性态多尺度分析方法

论文中文副题名无

论文英文题名 Multiscale analysis of concrete dam service ability under  
the influence of water-seepage diseases in cold region

论文英文副题名None

论文语种 汉语    论文摘要语种 汉、英    论文页数 145    论文字数 8.5 万

论文关键词 寒冷地区、混凝土坝、服役性态、渗水病害、多尺度分析

申请学位级别 工学博士     专业名称 < 专业名称 >

研究方向 < 具体研究方向 >

指导教师姓名 < 导师姓名 >     导师单位 < 导师单位 >

论文答辩日期 2018 年 9 月 7 日



# **Multiscale analysis of concrete dam service ability under the influence of water-seepage diseases in cold region**

Dissertation Submitted to

**Hohai University**

In Fulfillment of The Requirement

for the Degree of

**Doctor of Engineering**

By

**author's name**

**(author's department)**

Supervisor: Prof. **supervisor's name**

**September, 2018, Nanjing, P.R.China**



### 学位论文独创性声明：

本人所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同事对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。如不实，本人负全部责任。

论文作者（签名）：\_\_\_\_\_

签字日期：\_\_\_\_\_

### 学位论文使用授权说明：

河海大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社有权保留本人所送交学位论文的复印件或电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅。论文全部或部分内容的公布(包括刊登)授权河海大学研究生院办理。

论文作者（签名）：\_\_\_\_\_

签字日期：\_\_\_\_\_





## 前言

我国修建了大量的混凝土坝工程，这些水利工程在防洪、灌溉和发电、通航等方面发挥了巨大的作用。然而，由于我国具有独特的水资源分布特征，有相当一部分混凝土坝修建于高海拔或高纬度的东北、西北等寒冷地区，这些地区普遍存在昼夜温差大、冰冻周期长和年际冻融次数多等特点，容易引发混凝土坝出现冻融与溶蚀等典型渗水病害，导致大坝服役性能衰退，给工程安全造成威胁。因此，科学地分析寒冷地区混凝土坝在渗水病害影响下工作性态演化机制，并对其服役性态进行客观评估，已成为研究的热点。

针对上述问题，综合运用数学方法、力学理论、坝工知识和计算机技术，从微观、细观、宏观和整体性态变化及安全角度，系统开展了寒冷地区渗水病害影响下混凝土坝服役性态多尺度分析方法研究，取得以下主要创新性成果：

(1) 针对坝体混凝土材料多尺度多物相复合属性特征，引入三维微观水化模型，研究了坝体混凝土微观结构特性；采用静水压力与结晶压力复合作用模型，分析了坝体混凝土微观冻融力学性能演化规律；提出水泥基材料析钙溶蚀模型，并采用随机溶蚀算法，探究了坝体混凝土微观溶蚀力学性能演化特性。

(2) 分析了砂浆及混凝土材料多尺度物相特征，构建了坝体混凝土材料力学多尺度递进分析表征模型；通过引入数学渐进均匀化理论，以连续损伤力学为支撑，基于多尺度能量积分方法，提出了坝体混凝土材料在冻融和溶蚀两种典型渗水病害影响下力学性能多尺度递进分析模型。



## 摘要

本文综合应用数学和力学理论、坝工知识和大坝安全综合评价理论等，采用数值仿真、室内与现场试验、原型监测资料分析等手段，系统开展了寒冷地区渗水病害影响下混凝土坝服役性态多尺度分析方法研究，主要研究内容如下：

(1) 引入 HYMOSTRUC 3D 水化模型，研究了坝体混凝土材料微观尺度结构特性；采用静水压力和结晶压力复合作用模型，模拟了坝体混凝土材料冰冻破坏特性，据此分析了冻融影响下坝体混凝土材料微观力学性能演化规律；结合坝体混凝土材料渗透溶蚀退化机制分析，提出了水泥基材料析钙溶蚀模型，并与随机溶蚀算法有机融合，探究了坝体混凝土微观溶蚀力学性能演化特性。

(2) 采用多尺度摄动技术，将坝体混凝土材料多尺度力学问题转化为多尺度均匀化联合方程求解问题，由此提出了坝体混凝土多尺度力学递进分析模型；基于坝体混凝土材料在冻融与溶蚀影响下微观力学性能演化特性分析，并以连续损伤力学理论为支撑，采用多尺度能量积分方法，提出了坝体混凝土材料多尺度损伤表征方法，实现了寒冷地区渗水病害影响下坝体混凝土材料力学性能多尺度传递分析。

**关键词：** 寒冷地区；混凝土坝；服役性态；渗水病害；多尺度分析



## Abstract

The integrated application of mathematics and mechanics theory, dam engineering theory and dam comprehensive safety evaluation theory were introduced to systematically evaluate and research the concrete dam performance evolution under the influence of water-seepage diseases by adopting numerical simulation, indoor and field test and field data analysis method with multi-scales method. The main research contents were as follows:

(1) The micro-scale structural characteristics of concrete material were investigated by introducing the hydration model HYMOSTRUC 3D. Based on the frozen damage mechanism of the concrete material, the composite model of hydrostatic pressure and crystallization pressure was adopted to research the micro-mechanical concrete mechanical evolution properties; based on the corrosion degradation mechanism of the concrete under the corrosive environment, the calcium precipitation dissolution model of the cement-based material was established. By integrating with stochastic solution algorithm, the micro mechanical degradation characteristics of the concrete material was studied.

(2) By adopting the multi-scale perturbation technique, the multiscale mechanics problem of hydraulic concrete was transformed into solution problem of multiscale homogenization combination equation and the multiscale mechanical progressive model was thus established; based on the micro mechanical characteristics of the concrete material under the effects of freezing and thawing and corrosion, the multi-scale damage theory of concrete material was established by synthesizing continuum damage mechanics theory and multi-scale energy integral method, which could successfully realize the multi-scale mechanical properties transmission of concrete material in cold region under the effect of typical water-seepage diseases.

**Keywords:** cold region; concrete dam; service ability; water-seepage diseases; multiscale analysis



## 主要符号对照表

$\text{\LaTeX}$	一个很棒的排版系统
$\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$	一个很棒的排版系统的最新稳定版
$\text{\XeTeX}$	$\text{\LaTeX}$ 的好兄弟，事实上他有很多个兄弟，但是这个兄弟对各种语言的支持能力都很强
$\text{ctex}$	成套的中文 $\text{\LaTeX}$ 解决方案
$\text{CaCO}_3$	碳酸钙
$e^{\pi i} + 1 = 0$	集自然界五大常数一体的最美好方程，欧拉公式





## 目录

前言 .....	I
摘要 .....	III
Abstract .....	V
主要符号对照表 .....	VII
第一章 样本章 .....	1
1.1 研究的目的和意义 .....	1
1.2 坝体混凝土材料微观结构特性表征 .....	2
参考文献 .....	5
致谢 .....	7
附录 .....	9



## 插图清单

图 1.1.1	我国现场环境年均冻融循环次数分布图 .....	1
图 1.1.1	The average field environmental freezing and thawing times in China .....	1
图 1.2.2	硅酸盐水泥熟料颗粒扫描电子显微镜图 .....	2
图 1.2.2	The electron microscope scanning diagram of Portland cement Particle .....	2



## 附表清单

表 1.2.1	波兰特水泥氧化物化学组成成分表 .....	3
表 1.2.1	Chemical composition table of Poland special cement .....	3
表 1.2.2	波兰特水泥矿物组成成分表 .....	3
表 1.2.2	Mineral composition of Poland special cement .....	3



## 第一章 样本章

### 1.1 研究的目的是和意义

水库大坝不仅是调控水资源时空分布、优化水资源配置的重要工程措施，也是江河防洪工程体系的重要组成部分，是经济社会发展不可替代的基础支撑<sup>[1]</sup>。我国是举世闻名的治水大国，建坝数量、建设规模与技术难度均居世界前列，其中，混凝土坝由于其可靠性高和环境适应能力强等特点，是目前我国大、中型水利工程的主要坝型。然而，由于我国特殊的水电资源分布特征，有相当一部分混凝土坝修建于我国高海拔或高纬度的东北、西北等气候寒冷区域，由于寒冷地区普遍存在昼夜温差大、年平均冰冻周期长和年际冻融次数多等特点，极易导致坝体混凝土材料在严寒气候条件和复杂荷载工况作用下，出现冻融破坏和溶蚀损伤等典型渗水病害问题，进而导致大坝服役性能的衰退，威胁工程服役安全。

寒冷地区在地理学领域是指由于高海拔或者高纬度而形成的特别寒冷的气候区域，广义上中国的寒冷地区主要包括整个青藏高原，以及甘肃、内蒙古和新疆的高山地区以及东北和华北部分地区。寒冷地区气候条件十分恶劣，四季气温周期交替变化，气温年变幅大，冰冻期长，导致这些地区水利工程每年需要承受多次冻融循环（我国现场环境年均冻融循环次数分布如图1.1.1<sup>[2]</sup>）。

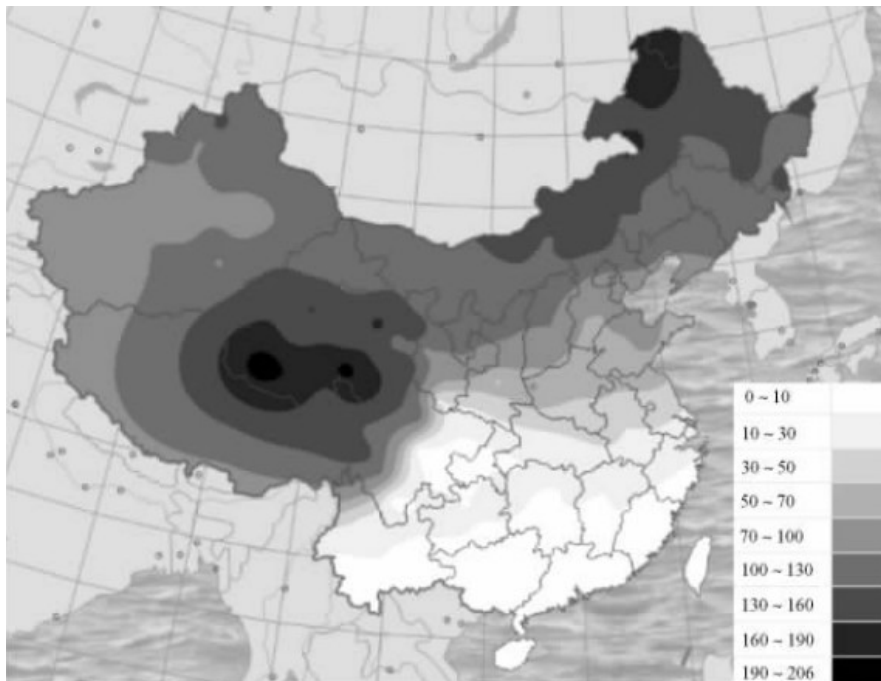


图 1.1.1 我国现场环境年均冻融循环次数分布图

Figure 1.1.1 The average field environmental freezing and thawing times in China

## 1.2 坝体混凝土材料微观结构特性表征

本节在对水泥基材料微观尺度基本水化反应和结构特性研究的基础上,引入三维微观水化模型,系统研究坝体混凝土材料三维微观结构特性,从而为后续研究寒冷地区渗水病害影响下坝体混凝土微观力学性能演化特性奠定基础条件。

### 1.2.1 水泥基材料基本水化反应

硅酸盐水泥生料主要由钙、硅、氧三种化学元素组成的氧化物构成,相应化学成分和简称分别为:  $\text{CaO}(\text{C})$ 、 $\text{SiO}_2(\text{S})$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{A})$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{F})$ 、 $\text{MgO}(\text{M})$ 、 $\text{SO}_3(\bar{\text{S}})$  和  $\text{H}_2\text{O}(\text{H})$ ,相应水泥熟料扫描电子显微镜图如图1.2.2。

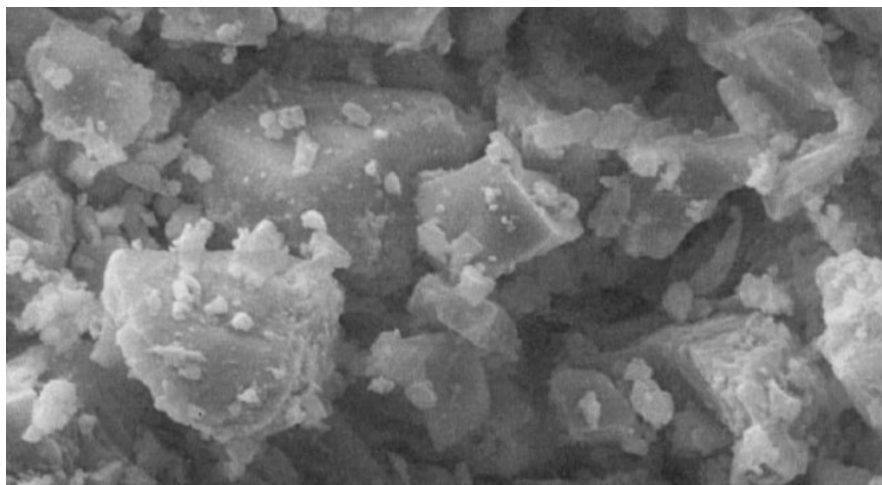


图 1.2.2 硅酸盐水泥熟料颗粒扫描电子显微镜图

Figure 1.2.2 The electron microscope scanning diagram of Portland cement Particle

### 1.2.2 水泥微观水化模型基本原理

本文主要通过引入 HYMOSTRUC 3D 模型用于模拟水泥水化反应和水泥基材料微观结构生成。该模型最早由荷兰 Technische Universiteit Delft 的 Klaas van Breugel 教授于 1991 年提出<sup>[3,4]</sup>,后经该大学的微观实验室 (Microlab) 研究人员的开发和完善,逐步形成了比较成熟的水泥微观水化数值计算平台。HYMOSTRUC 3D 模型可以综合考虑水泥化学组成、水泥颗粒尺寸分布、矿物掺合料的种类以及水灰比、养护条件等技术参数对水泥水化过程的影响,是迄今为止连续水化模型中较为系统和全面的水泥水化模型,下面重点研究该模型基本特点及其建模原理。

#### 1.2.2.1 HYMOSTRUC 3D 基本水化单元

元胞是 HYMOSTRUC 3D 模型基本水化单元,元胞边长  $S_x$  及元胞内部水泥颗粒分布主要由水灰比及水泥颗粒 PSD 决定。基于 Rosin-Rammler 方程,硅酸盐水泥颗粒 PSD 可以表示为:

$$G(x) = 1 - e^{-bx^n} \quad (1.2.1)$$

式中,  $x$  ( $\mu\text{m}$ ) 为水泥颗粒尺寸;  $b$  及  $n$  为待拟合常数。



### 1.2.3 算例分析

基于 HYMOSTRUC 3D 水化模型，采用波兰特水泥 CEM I 42.5 N 熟料进行水泥微观水化过程数值模拟，相应水泥熟料化学成分及矿物组成如表1.2.1和表1.2.2，水泥 Blaine 值为  $380m^2/kg$ 。

表 1.2.1 波兰特水泥氧化物化学组成成分表  
Table 1.2.1 Chemical composition table of Poland special cement

氧化物	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
百分比 (%)	64.4	20.36	4.96	3.17	0.64	0.14	2.57	2.09	0.35	0.14	0.18

表 1.2.2 波兰特水泥矿物组成成分表  
Table 1.2.2 Mineral composition of Poland special cement

矿物成分	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
百分比 (%)	65.83	14.76	7.64	9.15



## 参考文献

- [1] 胡四一. 确保水库大坝安全意义重大任务艰巨. 中国水利, 2008, 2008(20):3-4.
- [2] 武海荣, 金伟良, 延永东, 等. 混凝土冻融环境区划与抗冻性寿命预测. 浙江大学学报: 工学版, 2012(4):80-87.
- [3] Press D U. Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials. Ph.d Thesis Ed.tu Delft, 1991, 02(7):516-519.
- [4] 钱智炜, Erik S, 叶光, 等. 水泥净浆微观结构断裂破坏过程的三维模拟. 硅酸盐学报, 2010, 038(009):1658-1664.



## 致谢

感谢我的恩师……

还要特别感谢 hhuthesis 节省了论文排版的时间。



## 附录

### 个人简历

本人……。

### 攻读博士学位期间发表的主要成果

- [1] **author's name**, Anyone1, Anyone2, et al. Article's title. Journal's title, 2016, 2016(12):1-10. (SCI)
- [2] 作者姓名, 第二作者等. 论文题名 [J]. 期刊名. 已录用.(EI)

### 攻读博士学位期间参与的科研项目

- [1] 国家自然科学基金重点项目：基金名称 ABCD（编号：XXXXXXXXX）
- [2] 国家自然科学基金面上项目：基金名称 abcd（编号：YYYYYYYYY）

### 攻读博士学位期间所获的荣誉与奖励

- [1] 2013.06 获“优秀研究生”荣誉称号
- [2] 2016.12 获河海大学博士研究生国家奖学金